

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی تأثیر ناهمواری بر خصوصیات تونل زنی و آماری تانتالوم کاشت شده با استفاده از یون نیتروژن*

مقاله پژوهشی

امیر هوشنگ رمضانی[۱] ژاله ابراهیمی نژاد[۲]

DOI: 10.22067/jmme.2023.82763.1113

چکیده *در این مقاله، اثر نوع یون بر خصوصیات ترابردی از میان ساختارهایی که فصول مشترک آنها توسط فرآیند بمباران یون بر پایه تانتالوم ایجاد گردیده، بررسی شده است. یون نیتروژن استفاده شده در فرآیند کاشت یونی با انرژی ۳۰ کیلوالکترون ولت و در دوزهای مختلف در دمای محیط در نظر گرفته شده‌اند.برای مطالعه ریخت شنا سی سطوح لایه های نازک بمبارانه شده یونی، از آنالیز میکرو سکوپ نیروی اتمی (AFM) (Atomic Force Microscopic) استفاده شده و مقدار متوسط ناهمواری تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که فصول مشترکی‌هایی که با بمباران یون نیتروژن تولید شده‌اند تأثیرات بیشتری بر خصوصیات ترابردی دارند. همچنین نسبت پیک به دره کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش دوز یون نیتروژن، چگالی جریان به عنوان تابعی از ولتاژ کاهش یافته است هرچند این کاهش، نتیجه مستقیمی از پراکندگی ناشی از وجود ناهمواریست اما روند این کاهش برای دوزهای مختلف از نظم خاصی پیروی نمی‌کند، نمونه شماره یک مقدار احتمال عبور بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که تعیین میزان دوز در تعیین مقدار خصوصیات ترابردی از میان لایه های نازک ناهموار نقشی مهم ایفا می‌کند.*

واژه‌های کلیدی تانتالوم، ناهمواری سطح ، لایه نازک، کاشت یونی.

Investigating the Effect of Roughness on the Tunneling and Statistical Properties of Tantalum thin Layers Grown Using Nitrogen Ions

Amir Hoshang Ramezani Zhaleh Ebrahiminezhad

Abstract *In this article, the effect of ion type on the transport properties of the structures whose common phases were created by the tantalum-based ion bombardment process has been investigated. The nitrogen ions used in the ion seeding process are considered with an energy of 30 kV and in different doses at ambient temperature. To study the morphology of the surfaces of ion bombarded thin layers, atomic force microscope (AFM) analysis was used and the amount Average roughness is determined. The results show that the common seasons produced by nitrogen ion bombardment have more effects on the transport characteristics. Also, the peak-to-valley ratio decreases. In addition, with the increase of the nitrogen ion dose, the current density has decreased as a function of the voltage, although this decrease is a direct result of the dispersion caused by the existence of unevenness, but the process of this decrease does not follow a specific order for different doses, example sample number one indicates a higher probability of passing. The results show that determining the amount of dose plays an important role in determining the amount of transport characteristics through uneven thin layers.*

Keywords Tantalum, Surface Roughness, Thin film, Ion Implantation.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۳/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۱۰/۹ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

(۲) استادیار، گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

Email: ramezani.1972@gmail.com

مقدمه

رفتارهای سطح فلزات، عموما منجر به حل مسائل سائیدگی، اصطحکاک، سختی، فرسودگی، خوردگی و اکسیداسیون می‌شود. استفاده از کاشت یون، در این زمینه نسبتا جدید است. یک روش مستقیم برای تشکیل آلیاژهای فلزی با دقت مکانی کنترل شده استفاده از باریکه یون است. به این روش می‌توان موادی با خصوصیات جدید تولید نمود. با توجه به این روش‌ها ممکن است آلیاژهای خارجی مطلوبی توسط کاشت یون در ابر رساناها به دست آید که به کار آن در تکنولوژیهای دیگر با ارزش است.تغییر ابعاد فیزیکی در کاشت یون فلزات، تغییر مختصر سطح قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد [5-1]. انتخاب اولیه یونها به قابلیت چشمه‌های دستگاه کاشت یون و داشتن دانش قبلی در مورد آن دسته از یونهایی که اثرات مفیدی روی رفتار قراردادی فلزات دارند، بستگی دارد.

ویژگی های از قبیل در دسترس بودن، ارزان بودن و سادگی نسـبی فرایند سـاخت، باعث شـده اسـت که تانتالوم دارای کاربردهای فراوانی در صـنعت باشـد. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده در ابزار برشی، سازه های دریایی و بدنه‌کشتی ها، ابزار پزشکی وصنعت ماشین سازی اشاره کردکه درهمه این کاربردها خواص سـطحی این ماده همچون مقاومت در برابر خوردگی و سختی مورد توجه بوده و دانشمندان و محققین‌را به انجام تحقیقات روز افزون در این زمینه واداشته است. استفاده از روش بمباران یون جهت بهبود کیفیت سطح آلیاژ دانشی است که در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

به دلیل خواص مختلفی مانند مقاومت در برابر خوردگی بالا، خواص مکانیکی و چگالی کم، لایه های نازک مبتنی بر تانتالوم در زمینه‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند [8-6]. بمباران یون های اکسیژن، آرگون، کربن و نیتروژن سطح تانتالم را بهبود بخشـید [27,28]. پارامترهایی مانند دما، انرژی یون، چگالی جریان و تابش در ویژگی فیلم‌های بمبارانه‌شـده یونی مهم هسـتند. فرآیند بمباران یون و شـرایط رشـد بر مورفولوژی رابط های بمبارانه شـده و نمونه های تولید شـده مکانیکی، الکتریکی و نوری تأثیر می گذارد [9-7]. آثار تجربی و نظری زیادی وجود دارد که آنها خواص انتقال را از طریق لایه های نازک مبتنی بر تانتالوم مورد مطالعه قرار دادند [10]. همچنین، تأثیر زبری و مورفولوژی سـطوح مبتنی بر تانتالوم بر عملکرد دسـتگاه‌های الکتریکی مورد بررسـی قرار گرفته اسـت [11,12] روش های مختلفی برای تولید رابط های ناهمواروجود دارد و تأثیر سـطوح/رابط‌های ناهموار بر رسـانایی الکتریکی سـازه‌ها بررسـی شـده اسـت [33] فرآیند بمباران یون باعث زبر شـدن سطوح مشترک / سطوح حاصل می شود [28-22].

فرایند ازمایشگاهی بمباران یون

دردر این آزمایش از نمونه های تانتالوم در ابعاد $۱\times۱\times۰٫۵\ mm$ استفاده شده، بمباران یونی نمونه ها در آزمایش توسط دستگاه کاشت یون مرکز تحقیقات پلاسما دانشگاه آزد اسلامی واحد علوم وتحقیقات با انرژی ۲۵۰ کیلو الکترون ولت با چگالی جریان یونی $۴۰\ \mu A/cm^2$ و شـار یونی از ۱×۱۰^{۱۷} تا $۷ \times ۱۰^{۱۷}\ ion/cm^2$ انجام گرفت. شـرایط بمباران بر روی نمونه‌های تانتالوم برای تمام نمونه ها در جدول دو آورده شده است. برای بمباران یون، نیاز به یک منبع یون اسـت که با به بکاربردن شتاب‌دهنده ذره‌ای یون‌ها را می‌توان با سرعت زیاد روی سطح مورد نیاز بمباران می شود. در این فرآیند، یون‌های پر انرژی که به سـطح جامد برخورد میکنند، می توانند برای به وجود آوردن تغییرات فیزیکی، شـیمیایی و متالوژیکی سـطوح جامدات مفید باشند. زمان انجام بمباران هر نمونه از رابطه زیر محاسبه شده است:

نتایج و بحث

یکی از مشخصاتی که بعد از بمباران یون تغییر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشـت دانه‌بندی سـطح نمونه تحت بمباران می‌باشـد. تغییرات دانه‌بندی از این‌نظر مورد توجه می‌باشـد که در اکثر مواقع رابطه‌ای بین دانه‌بندی و زبری سـطح وجود دارد. برای بررسـی این مشـخصـه از دسـتگاه تصـاویر به‌دسـت آمده از میکروسـکوپ نیروی اتمی اسـتفاده شـده اسـت. در ذیل نتایج آنالیز میکرو سکوپ نیروی اتمی برای نمونه‌های بمباران شده و نمونه بمباران نشده آورده شده است.

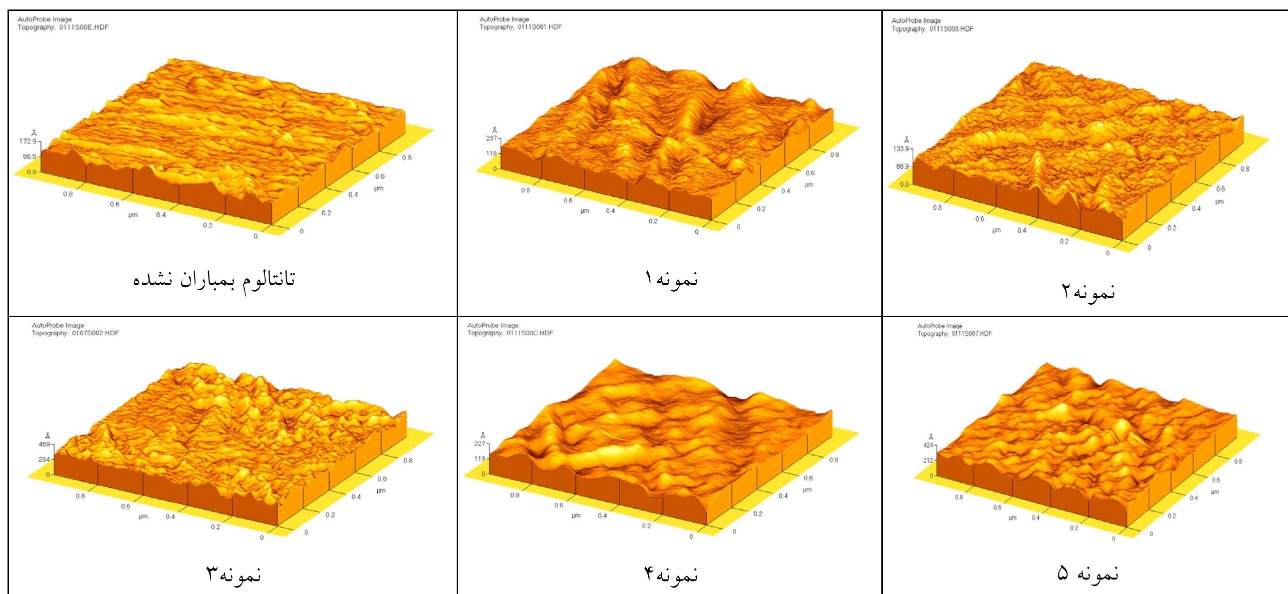
آنالیز سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

در این تحقیق بر روی سـطوح تانتالوم توسـط یون نیتروژن با جریان یونی ۱×۱۰^{۱۷} تا ۱۰×۱۰^{۱۷} (یون بر سـانتی متر مربع) فرآیند کاشت انجام شـده اسـت. فرآیند کاشـت یونی منجر به

تغییر ریخت شناسی سطوح می گردد و تمامی سطوح ناشی از این فرآیند ناهموار هستند. این سطوح ناهموار به عنوان فصل مشترک در ساختارهای چندلایه ای مورد استفاده قرار گرفته و بر خواص ترابردی این ساختارها اثر می‌گذارند. در ادامه تاثیر ناهمواری فصول مشترک خام (کاشت نشده) و کاشت شده بر احتمال عبور و رسانندگی الکتریکی ساختارهای چندلایه ای بررسی خواهد شد.

در شکل (۱) تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی سطوح کاشت نشده و کاشت شده به منظور بررسی بهتر نشان داده شده است. جدول (۳)، مقایسه ای از میزان ناهمواری نمونه‌های کاشت شده با یون‌های آرگون و نیتروژن را ارائه می دهند. جدول (۱) ناهمواری نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند کاشت یونی با یون نیتروژن را نمایش می‌دهد.

میانگین ناهمواری یکی از کمیت‌هایی است که در توصیف ناهمواری استفاده می‌شود. بنابراین به منظور دستیابی به اطلاعات جامع‌تر در خصوص بررسی نوع فصول مشترک تولید شده، محاسبات مربوط به خواص ترابردی انجام شده است. در بخش حاضر، تاثیر ناهمواری فصول مشترک (ناشی از فرآیند کاشت یونی با نیتروژن با دوزهای متفاوت)، بر خواص ترابردی ساختارهای چندلایه‌ای بررسی می شود که این فصول مشترک در آن‌ها استفاده شده‌اند. محاسبات این خواص بر اساس روش ماتریس انتقال و تقریب الکترون نسبتا آزاد انجام شده است. تصاویر و تحلیل میکرو سکوپ نیروی اتمی شکل واندازه دانه ها را در سطحی به اندازه یک میکرومتر در یک میکرومتر تحت تاثیر یون های نیتروژن و آرگون نشان می‌دهد. در ادامه، به بررسی تاثیر نوع یون‌های به کار گرفته شده در فرآیند کاشت یونی بر خصوصیات ترابردی ساختارهای چندلایه پرداخته می‌شود.



شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از تانتالوم بمباران شده با نیتروژن و بمباران نشده

جدول ۱ ناهمواری نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند کاشت یونی با یون نیتروژن

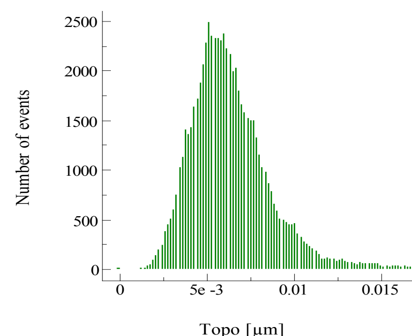
نمونه	جریان یونی نیتروژن	ناهمواری ریشه میانگین مربعی A°	ناهمواری میانگین A°
بمباران نشده	۰	۱۴,۱	۴۱,۹
۱	۱×۱۰^{۱۷}	۲۲,۱	۶۱,۹
۲	۳×۱۰^{۱۷}	۱۸,۹	۵۰,۳
۳	۵×۱۰^{۱۷}	۵۹,۹	۱۷,۱
۴	۷×۱۰^{۱۷}	۲۳,۶	۷۶,۳

بررسی تغییرات توپوگرافی سطح

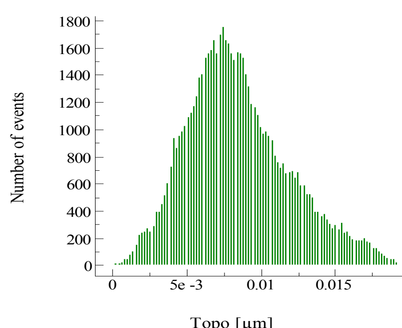
مقایسه نتایج زبری با توپوگرافی سطح که از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی به‌دست می‌آید بسیار مفید است زیرا وابستگی زیادی بین زبری سطح و توپوگرافی سطح وجود دارد. در مورد نمونه‌های این تحقیق نیز تغییرات توپوگرافی با تغییرات زبری کاملا مطابقت دارد. توپوگرافی سطح نمونه میزان تغییرات پستی و بلندی سطح را نشان می دهد. هرچه نمودار آن پهن‌تر باشد به این معنا می‌باشد که یکنواختی سطح کمتر و درنتیجه سطح زبرتر است. نمودارهای باریک‌تر نشان دهنده یکنواختی بیشتر است و سطح در این حالت زبری کمتری دارد. در شکل (۲) تغییرات توپوگرافی سطح برای تانتالوم پس از کاشت یون نیتروژن با دزهای مختلف را نشان می‌دهد. در هریک از این شکل‌ها محور عمودی نمایش تعداد ذرات و محور افقی نمایش منطقه‌بندی برروی سطح می‌باشند. این شکل نمایش میزان دانه‌بندی را برروی محدوده انتخاب شده سطح نمایش می‌دهد.

نمایش توپوگرافی نمونه کاشت نشده باریک بودن توپوگرافی را نمایش می‌دهد که این سطح رافنس (پستی و بلندی) کمتر و یکنواختی بیشتر دارد. نمایش توپوگرافی نمونه های بمباران شده با جریان یونی ۱×۱۰^{۱۷} و بمباران شده با جریان یونی ۳×۱۰^{۱۷} نمودار پهن‌تری را نسبت به نمونه کاشت نشده نمایش می‌دهد. این منحنی‌های گاوسی غیریکنواخت بودن سطح را نمایش می‌دهد و تغییرات زبری سطح نسبت به نمونه اول افزایش داشته است.

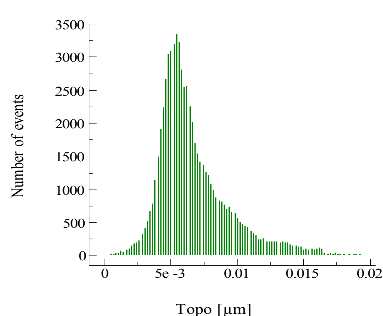
تغییرات توپوگرافی سطح برای نمونه‌های کاشته شده با دز $۵ \times ۱۰^{۱۷} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ و $۷ \times ۱۰^{۱۷} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ نمایش پهنای این منحنی ها نسبت به نمونه کاشت نشده غیریکنواخت بودن سطح و درنتیجه افزایش زبری سطح را نمایش می‌دهد. توپوگرافی سطح نمونه کاشته شده با دز $۱۰ \times ۱۰^{۱۷} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ نشان می‌دهد که پهنای منحنی نسبت به نمونه کاشت نشده افزایش یافته و زبری سطح نیز افزایش یافته است و سطح را غیریکنواخت نشان می‌دهد.



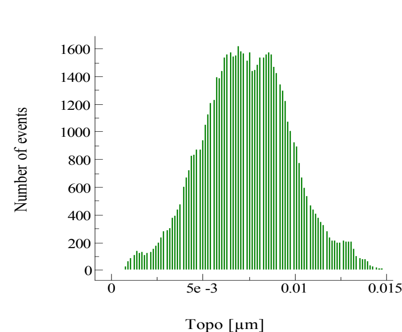
نمونه۲



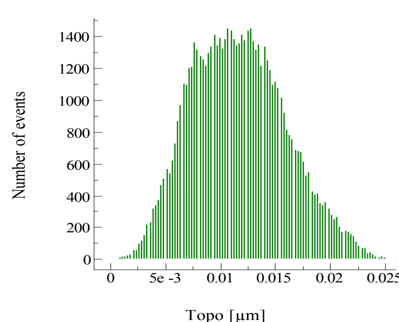
نمونه۱



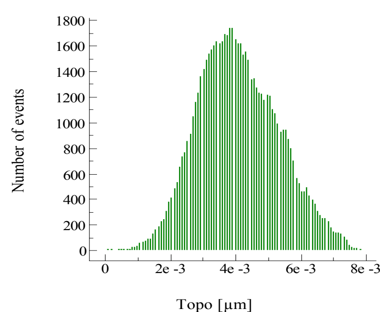
تانتالوم بمباران نشده



نمونه۵



نمونه۴



نمونه۳

شکل ۲ تغییرات توپوگرافی سطح تانتالوم قبل و بعد از کاشت یون

بررسی احتمال عبور از میان لایه ها

کاهش بیشترین مقدار قابل د سترس احتمال عبور یکی از نتایج ا صلی وجود ناهمواری در نمونه ها به شمار می‌رود. بنابراین با اســـتفاده از روش ماتریس انتقال، تاثیر فرآیند کاشـــت یونی بر خصوصیات ترابردی نمونه ها بررسی شده است. به این منظور، تابع موج در هر ناحیه به شکل زیر در نظر گرفته شده است.

$$\psi_j = \sum_q (a_j^{\gamma}(q) e^{(ik_n z)} + b_j^{\gamma}(q) e^{-(ik_n z)}) e^{(iq.(x,y))}, \qquad (۱)$$

با ا ستفاده از پیو ستگی تابع موج و م شتق آن، احتمال عبور از روش ماتریس انتقال قابل محاســـبه خواهد بود. q بردار موج عرضـــی و $K_n = [2m\,(V_n - E_n)]^{1/2}/\hbar$ عدد موج اســـت. V_nبرای م ناطق n=1,2 و ۳ به ترتیب0 ، $E_{FL} + V - \frac{eV_{app}}{4}$, $-eV_{app}$ا ست که $V = \Delta E_c[\theta(z - \varepsilon(r))]$ و $\varepsilon(r)$ ارتفاع ف صل مشترک است.

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ 0 \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}, \qquad (۲)$$

بر طبق این تعریف، رابطه عبور به شکل زیر است [16]:

$$T(E, V_{app}) = \frac{k_3 m_3}{k_1 m_1} \left(\frac{a_3}{a_1}\right)^2 , \qquad (۳)$$

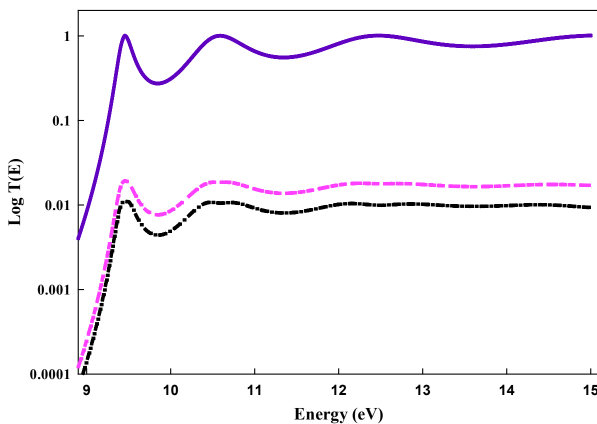
بنابراین، چگالی جریان به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی به صورت زیر نوشته می‌شود [3]:

$$j(V_{app}) = \frac{em^* k_B T}{4\pi^2 \hbar^3} \int_0^{\infty} T(E, Vapp) \ln\left[\frac{1+\exp[{(E_F - E)}/{k_B T}]}{1+\exp[{(E_F - E - eV_{app})}/{k_B T}]}\right] dE, \qquad (۴)$$

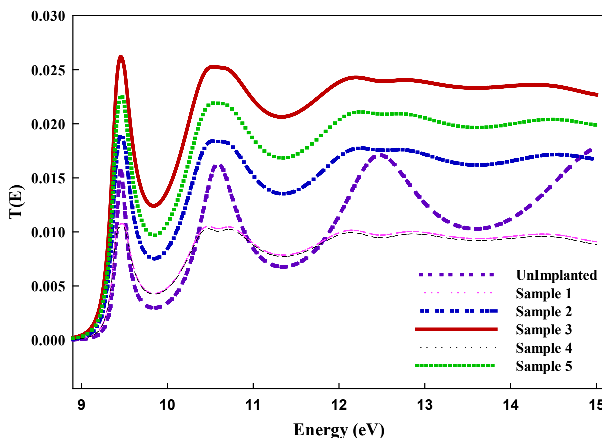
فصول مشترک اول و سوم ساختار، های ناهموار در نظر گرفته شده و بنابراین مقدار کمیت‌های فوق را تحت تاثیر قرار می‌دهند. همان‌طور که ذکر شد، نمونه‌های مذکور یا کاشت نشده هستند و یا با استفاده از روش کاشت با یون نیتروژن بر روی تانتالوم رشد یافته‌اند. ضخامت نمونه ها یک نانومتر و سطح آن‌ها 50×50 نانومتر مربع است. جرم موثر الکترونی به صورت m_e جرم الکترون در نظر گرفته شده است [29,30].

اکنون می‌توان احتمال عبور را بر حسب انرژی الکتون‌های فرودی برای نمونه کاشت نشده (با و بدون در نظر گرفتن ناهمواری) و نمونه شماره یک، در شکل (۳) رسم نمود.

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، تاثیر عمده ناهمواری کاهش احتمال عبور به واسطه فرآیند پراکندگی الکترون است. می‌توان منحنی مشابه برای سایر نمونه ها نیز رسم نمود اما در این‌جا مقایسه‌ی تاثیر میزان دوز در فرآیند کاشت یونی بر روی میزان پراکندگی الکترون‌ها مورد بحث و علاقه است. بنابراین، در شکل (۴)، مؤلفه‌های پراکنده شده احتمال عبور به صورت تابعی از انرژی الکترون فرودی نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳ تاثیر ناهمواری بر احتمال عبور ب ترتیب از بالا: نمونه کاشت نشده بدون در نظر گرفتن ناهمواری، نمونه کاشت نشده و نمونه کاشت نشده اول



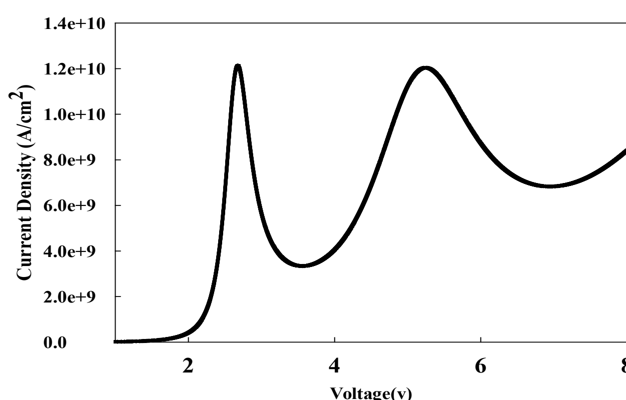
شکل ۴ تاثیر ناهمواری بر مولفه‌های پراکنده شده احتمال عبور برای نمونه کاشت نشده و نمونه‌های کاشت شده

در مقایسه حالت واقعی نسبت به حالت (ایده ال) بدون ناهمواری، فرآیند پراکندگی، مانع از رسیدن مقدار احتمال عبور به بیشینه مقدار ممکن یعنی عدد یک می‌شود. همچنین تغییرات احتمال عبور به عنوان تابعی از میزان ناهمواری (برای نمونه‌های

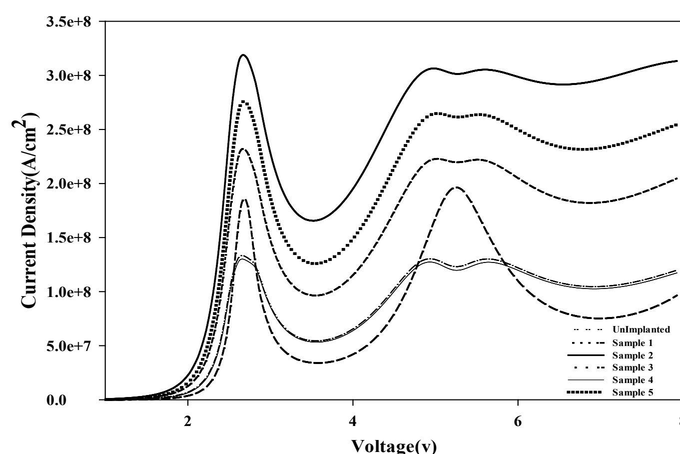
کاشت شده با دوزهای مختلف) نشان می‌دهد که با افزایش میزان دوز یونی، سطوح از نظر هموارتر شدن یا زبرتر شده رفتارهای متفاوتی نان می‌دهندد. به عنوان مثال نمونه شماره سه بیشترین میزان مولفه پراکندگی احتمال عبور را نشان می‌دهد. و در ادامه، دوز یون‌های استفاده شده در فرآیند کاشت بیشتر باشد، سهم پراکندگی ناشی از ناهمواری کاهش می‌یابد.

به منظور بررسی تاثیر پراکندگی ناشی از ناهمواری بر رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها، در شکل (۵) ، مشخصه جریان– ولتاژ، I-V (طبق رابطه شماره ۴) نمونه کاشت نشده نشان داده شده است. منحنی‌های برای حالت ایده‌ال (بدون در نظر گرفتن ناهمواری) و حالت واقعی (با در نظر گرفتن ناهمواری) ترسیم شده‌اند. در پدیده تونل‌زنی، یک الکترون بیشترین میزان احتمال تونل‌زنی کوانتومی را دارا خواهد بود اگر فصول مشترک ایده‌ال و بدون ناهمواری لحاظ شوند. این امر منجر به بیشترین مقدار در قله مشخصات I-V خواهد شد.

هرچقدر میزان ولتاژ اعمالی افزایش یابد، در ابتدا، مقدار جریان به بیشینه مقدار رسیده و سپس با افزایش ولتاژ، جریان در یک منطقه مقاومت دیفرانسیلی منفی کاهش می‌یابد. ادوات الکترونیکی با این مشخصات در سوئیچ‌های الکترونیکی سریع، تولید نوسانات مایکروویو و به عنوان تشدید کننده فرکانس برای فرکانس‌های بالا استفاده می‌شوند [10-8]. به همین ترتیب منحنی‌های دیگری برای نمونه‌های کاشت شده رسم شده است. به‌عنوان هدف مهمی در این مطالعه، تأثیر میزان دوز یون‌های استفاده شده در فرآیند کاشت یونی بر روی ناهموار یا هموار نمودن فصول مشترک (نمونه‌ها) بررسی شده است. بنابراین، مشخصه I-V نمونه‌های کاشت شده (مولفه‌های پراکنده شده) در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۵ چگالی جریان بر حسب ولتاژ برای نمونه کاشت نشده با حالت ایده ال (بدون در نظرگرفتن ناهمواری)



شکل ۶ چگالی جریان نمونه کاشت نشده و نمونه‌های کاشت شده بر حسب ولتاژ اعمالی

نتایج نشان می‌دهند که پراکندگی ناشی از ناهمواری فصول مشترک، قله تونل‌زنی تشدیدی جریان را کاهش داده و دره جریان را افزایش می‌دهد. بنابراین، نسبت قله به دره در جریان نسبت به حالت با فصول مشترک ایده‌ال کاهش یافته است. به علاوه، سهم مولفه‌های پرراکنده شده چگالی جریان با افزایش دوز یون‌ها بخصوص برای نمونه دوم افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن نتایج فوق می‌توان به این جمع بندی رسید که پدیده ترابرد و تونل‌زنی در ادوات الکترونیکی که سطوح مشترکشان با فرآیند کاشت یونی تولید می‌گردند قابل کنترل بوده و این روش می‌تواند در ساخت این ادوات بسیار کمک کننده باشد. شکل ۶، سهم پراکنده احتمال عبور را از ساختارهای پنج لایه ای را نشان می‌دهد که فصول مشترک کاشت نشده هستند. فصل مشترک اول و سوم این ساختار ناهموار در نظر گرفته شده است. تونل‌زنی تشدیدی زمانی رخ می‌دهد که انرژی الکتون‌های فرودی با انرژی پایین ترین سطح انرژی نیمه مقید در چاه برابر باشد [25]. این امر منشا قله‌ها و دره‌های ظاهر شده در نمودار احتمال عبور است. بر اساس نتایج به دست آمده، چگالی جریان با افزایش دوز یون‌های استفاده شده در فرآیند کاشت یونی کاهش می‌یابد زیرا افزایش دوز یون‌ها موجب ناهموار شدن فصول مشترک می‌شود. نتایج فوق با نتایج به دست آمده از کارهای تجربی دیگر قابل مقایسه بوده و در طراحی ادوات الکترونیکی مفید هستند [13-9].

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، لایه های نازک تانتالوم به عنوان نمونه خام در نظر گرفته شده و فرآیند کاشت یونی بر روی آن ها انجام شده است. یون‌های در نظر گرفته شده برای فرآیند کاشت، نیتروژن در انرژی مشخص و با دوزهای متفاوت هستند. به منظور بررسی سطوح تولید شده از تحلیل تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شده است. تمامی سطوح موجود تولید شده ناهموار بوده و به علاوه فرآیند کاشت یونی منجر به تغییر ریخت شناسی سطوح تولید شده می‌شوند. از طرفی این سطوح تولید شده ناهموار در ساخت ادوات الکترونیکی متفاوت به کار گرفته می-شوند. احتمال عبور و چگالی جریان این ساختارهای چند لایه‌ای که سطوح مشترکشان با استفاده از نمونه خام و همچنین نمونه های تولید شده از فرآیند کاشت یونی تولید شده‌اند، محاسبه شده است. یکی از اثرات اصلی ناهمواری، کاهش احتمال عبور از میان ساختارهای چندلایه است. نتایج نشان می‌دهد که میزان پراکندگی به دلیل حضور فصول مشترک ناهموار تولید شده با کاشت یون بیشتر است. به علاوه محاسبات چگالی جریان این نتایج بدست آمده را تأیید می‌کند. همچنین با افزایش دوز یون‌ها و در برخی موارد، سطوح تولید شده هموارتر بوده و میزان پراکندگی الکترون از آن‌ها کاهش می‌یابد که این نکته می‌تواند در طراحی و بهینه سازی ساختارهای الکترونیکی مدنظر قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه ازاد اسلامی واحد تهران غرب انجام شده است.

مراجع

[1] N. Kalyanasundaram, M.C. Moore, J.B. Freund and H.T. Johnson, ”Stress evolution due to medium-energy ion bombardment ofsilicon,” *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 483–491, (2006). https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.028

[2] S.S. Patil, R.P. Fernandes, N. K. Patel, P. A. Rayjada, P. M. Raole and D. C. Kothari,”Corrosion resistance study of argon implanted and ion-beam-mixed 316 SS,” *Surface and Coatings Technology*, Vol. 196, no. 1-3, pp. 284–287, (2005). https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.111

[3] A. K. De, J. G. Speer, D. K. Matlock, D. C. Murdock, M. C. Mataya, R. J. Comstock, “Deformation-induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel,” *Metallurgical and Materials Transactions A*,Vol. 37, pp. 1875–1886, (2006). https://doi.org/10.1007/s11661-006-0130-y

[4] G.S.Chen, S.T.Chen, “Diffusion barrier properties of single- and multilayered quasi-amorphous tantalum nitride thin films against copper penetration,” *Journal of Applied Physics*,Vol. 87,no. 12, pp. 8473 - 8482, (2000). https://doi.org/10.1063/1.373566

[5] J.C. Chuang, M. C. Chen, ”Properties of thin Ta-N films reactively sputtered on Cu/SiO2/Si substrates,” *Thin Solid Films*,Vol. 322, no. 1-2, pp. 213-217, (1998).

https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00914-0

[6] M. Stavrev, D. Fischer, C. Wenzel, K. Drescher and N. Mattern,“Crystallographic and morphological characterization of reactively sputtered Ta, Ta-N and Ta-N-O thin films,” *Thin Solid Films*, Vol. 307, no. 1-2, pp.79–88,(1997).

https://doi.org/10.1016/S0040-6090(97)00319-2

[7] A. H. Ramezani, A. H. Sari and A. Shokouhy, “The effects of argon ion bombardment on the corrosion resistance of tantalum,” *International Nano Letters*,Vol. 7, pp. 51–57, (2017).

https://doi.org/10.1007/s40089-017-0201-7

[8] Y. Li, S. Wei, X. Cheng, T. Zhang and G. Cheng, “Corrosion behavior and surface characterization of tantalum implanted TiNi alloy,” *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, no. 13, pp. 3017–3022, (2008).

https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.11.003

[9] K. Ghosh, R. K. Pandey, “Assessment of fractal and multifractal features of sol-gel spin coated ZnO thin film surface,” *Materials Research Express*, Vol. 6, no. 7, (2019).

https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab25d7

[10] T. G. Bifano, H. T. Johnson, P. Bierden and R. K. Mali, “Elimination of stress-induced curvature in thin-film structures,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, no. 5, pp. 592–597, (2002).

https://doi.org/10.1109/JMEMS.2002.802908

[11] Zh. Ebrahiminejad, S. F. Masoudi, G. R. Jafari and R. S. Dariani,” Effects of self-affine roughness characteristics on electron transmission through tunneling structures,” *Thin Solid Films*, Vol. 522, pp. 233–237, (2012).

https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.08.042

[12] D. Raoufi, F. Hosseinpanahi, ” The effect of film thickness on surface morphology of ITO thin films,” *Journal of Theoretical and Applied Physics*, Vol. 7, no.1, pp. 21, (2013).

https://doi.org/10.1186/2251-7235-7-21

[13] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and Zh. Ebrahiminejad, “Statistical and fractal analysis of nitrogen ion implanted tantalum thin films,” *Applied Physics A*, Vol. 126, pp. 481, (2020).

https://doi.org/10.1007/s00339-020-03671-7

[14]A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and Zh. Ebrahiminejad, ”Structural and mechanical properties of tantalum thin films ected by nitrogen ion implantation,” *Modern Physics Letters B*, Vol. 34, no. 15, pp. 2050163, (2020).

https://doi.org/10.1142/S0217984920501638

[15] Z.W. Kowalski, J. Wilk and J. Martan,”Surface morphology of steel and titanium induced by ion beam bombardment - Comprehensive analysis,” *Vacuum*, Vol. 83, pp. 208–213, (2009).

https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.01.065

[16] A. H. Ramezani, A. H. Sari and A. Shokouhy," The effects of argon ion bombardment on the corrosion resistance of tantalum, " International Nano Letters, Vol. 7, pp. 51-57, (2017). https://doi.org/10.1007/s40089-017-0201-7

[17] A.H. Ramezani, S. Hoseinzadeh, Z. Ebrahiminejad.," Structural and mechanical properties of tantalum thin films ected by nitrogen ion implantation "*Modern Physics Letters B* "Vol.34, no. 15, p.2050163 ,(2020). https://doi.org/10.1142/S0217984920501638

[18] S. Hoseinzadeh, A. H. Ramezani," Corrosion Performance of Ta/Ni Ions Implanted with WO_3/FTO," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol. 39, no. 5, pp. 501-507, (2018). https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/02579731-201810-201812100006-201812100006-501-507

[19] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi, "Structural modification of tantalum crystal induced by nitrogen ion implantation,*" Bulletin of Materials Science,* Vol. 39, pp. 633-640, (2016). https://doi.org/10.1007/s12034-016-1212-0

[20] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and A. H. Sari," Experimental Investigation of Corrosion Improvement Implanted Ta by Ar–Ni Ions," *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics,* Vol. 14, no. 3, pp. 425-430, (2019). https://doi.org/10.1166/jno.2019.2527

[21] A. H. Ramezani, M. R. Hantehezadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi,"Corrosion resistance behavior of nitrogen ion-implanted in tantalum," *Applied Physics A*, Vol. 122, pp. 179, (2016).
https://doi.org/10.1007/s00339-016-9712-8

[22] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh, Z. Ebrahiminejad and M. R. Hantehzadeh, " The study of mechanical and statistical properties of nitrogen ion-implanted Tantalum bulk," *Optik,* Vol. 225, pp. 165628, (2021). https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165628

[23]A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh and Z. Ebrahiminejad, "Statistical and fractal analysis of nitrogen ion implanted tantalum thin films," *Applied Physics A,* Vol.126,pp. 1-6 ,(2020). https:// doi.org/10.1007/s00339-020-03671-7

[24] A. H. Ramezani, S. Hoseinzadeh, Zh. Ebrahiminejad and M .Sangashekan," Microstructural and energy-dispersive X-ray analyses on argon ion implantations in tantalum thin films for microelectronic substrates," *Electronics,*Vol. 10, no. 23, pp. 2941, (2021). https://doi.org/10.3390/electronics10232941

[25] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi," Microstructure and corrosion resistance of tantalum after nitrogen ion implantation, " *Corrosion Engineering, Science and Technology,*Vol. 51, no. 6, pp. 393-399 , (2016). https://doi.org/10.1080/1478422X.2015.1124503

[26] A. H. Ramezani, M. Ghoranneviss, A. Shokouhy and A. H.Sari," Corrosion resistance modification of AISI 304 stainless steel using argon ion bombardment," *Journal of fusion energy*, Vol. 30, pp. 64-67, (2011). https://doi.org/10.1007/s10894-010-9345-4

[27] A. H. Ramezani, M. R. Hantehzadeh, M. Ghoranneviss and E. Darabi, "Mechanical and electrochemical properties of tantalum implanted by nitrogen ions," *High Temperature Material Processes, An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*,Vol. 18, no. 1-2, pp. 143-153, (2014). https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2015015478

[28] S. Hoseinzadeh, A. H. Ramezani," Tantalum/Nitrogen and n-type WO3 semiconductor/FTO structures as a cathode for the future of Nano devices," *Journal of Nanostructures,*Vol. 9, no. 2, pp. 276-286, (2019). https://doi.org/10.22052/JNS.2019.02.010